ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS E *Escherichia coli* EM GRADIENTE ALTITUDINAL NA CACHOEIRA DO PAQUETÁ, ILHABELA (SP)

Victor Hugo Amorim Auzier[1], Karolina Marie Alix Benedictte Van Sebroeck Dória[1]

[1]Centro Universitário Módulo, Rua Maria D'Assumpção Carvalho, 1000, Martim de Sá, CEP 11662-903, Caraguatatuba-SP, Brasil

Autor para correspondência: victorhaauzier@gmail.com

Resumo

Resumo

Este trabalho avaliou a qualidade microbiológica das águas da Cachoeira do Paquetá, em Ilhabela (litoral norte de São Paulo), ao longo de seu gradiente altitudinal, entre abril e maio de 2025. Foram conduzidas cinco campanhas quinzenais em cinco pontos amostrais, distribuídos entre 212 m e 6 m de altitude, totalizando 25 amostras. A quantificação de coliformes totais (CT) e *Escherichia coli* (EC) seguiu o protocolo do kit cromogênico Compact Dry EC (Hardy Diagnostics/Shimadzu, certificado AOAC nº 110402), com inoculação direta de 1 mL e incubação a 37 ± 1 °C por 24 h. Verificou-se um claro gradiente crescente de contaminação no sentido montante–jusante: as médias de CT passaram de 45,0 ± 24,2 UFC/mL em P1 (212 m) para 225,2 ± 55,5 UFC/mL em P5 (6 m); o ponto P4 destacou-se pela alta variabilidade (215,4 ± 139,9 UFC/mL), sugestiva de contaminação episódica. Para EC, as médias oscilaram entre 0,2 ± 0,45 UFC/mL (P1) e 3,4 ± 1,14 UFC/mL (P5). A ANOVA one-way apontou diferenças significativas tanto para CT ($F_{4,20}$ = 9,19; p = 0,0002) quanto para EC ($F_{4,20}$ = 10,43; p = 0,0001), achado confirmado pelo teste de Kruskal-Wallis. O post-hoc de Tukey HSD separou os pontos em dois agrupamentos: P1, P2 e P3 (Mata Atlântica preservada) e P4 e P5 (áreas sob influência antrópica). A correlação de Pearson entre altitude e contagens individuais foi negativa e significativa (CT: r = −0,577; p = 0,0025; EC: r = −0,606; p = 0,0013). Convertidas para UFC/100 mL, as médias de *E. coli* em P4 e P5 (240 e 340 UFC/100 mL) enquadram-se na categoria "muito boa" da Resolução CONAMA nº 274/2000 para recreação de contato primário, mas ultrapassam o limite "excelente" (≤ 200 UFC/100 mL), configurando alerta sanitário. O padrão observado tem como principal fator explicativo a precariedade da infraestrutura sanitária do município — apenas 56,2% da população dispõe de coleta de esgoto (SINISA, 2024).

Palavras-chave: Qualidade da água; *Escherichia coli*; Gradiente altitudinal; Mata Atlântica; Ilhabela.

Abstract

This study assessed the microbiological quality of waters of the Paquetá Waterfall, in Ilhabela (northern coast of São Paulo State, Brazil), along its altitudinal gradient, between April and May 2025. Five biweekly sampling campaigns were carried out at five sampling points distributed between 212 m and 6 m altitude, totaling 25 samples. Total coliforms (TC) and Escherichia coli (EC) were quantified using the chromogenic Compact Dry EC kit (Hardy Diagnostics/Shimadzu, AOAC Certificate No. 110402), through direct inoculation of 1 mL and incubation at 37 ± 1 °C for 24 h. A clear increasing

contamination gradient was observed from upstream to downstream: TC means rose from 45.0 ± 24.2 CFU/mL at P1 (212 m) to 225.2 ± 55.5 CFU/mL at P5 (6 m); P4 stood out for its high variability (215.4 ± 139.9 CFU/mL), suggesting episodic contamination. For EC, means ranged from 0.2 ± 0.45 CFU/mL (P1) to 3.4 ± 1.14 CFU/mL (P5). One-way ANOVA indicated significant differences for both TC ($F_{4,20} = 9.19$; $p = 0.0002$) and EC ($F_{4,20} = 10.43$; $p = 0.0001$), confirmed by the Kruskal-Wallis test. Tukey's HSD post-hoc test separated the points into two groups: P1, P2 and P3 (preserved Atlantic Forest) and P4 and P5 (areas under anthropic influence). Pearson correlation between altitude and individual counts was negative and significant (TC: $r = -0.577$; $p = 0.0025$; EC: $r = -0.606$; $p = 0.0013$). When converted to CFU/100 mL, mean E. colivalues at P4 and P5 (240 and 340 CFU/100 mL) fall within the "very good" category of CONAMA Resolution No. 274/2000 for primary contact recreation, but exceed the "excellent" limit (≤ 200 CFU/100 mL), constituting a sanitary alert. The main explanatory factor is the precariousness of the municipality's sanitary infrastructure — only 56.2% of the population has access to sewage collection (SINISA, 2024).

Keywords: *water quality; Escherichia coli; altitudinal gradient; Atlantic Forest; Ilhabela*.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água doce em quantidade e qualidade adequadas figura entre os maiores desafios socioambientais do século XXI. Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2025, publicado pelo Programa Mundial de Avaliação dos Recursos Hídricos (WWAP), estima-se que 2,2 bilhões de pessoas não dispunham de água potável gerida de forma segura em 2022, e cerca de 4 bilhões enfrentam escassez hídrica severa durante ao menos parte do ano (UNESCO, 2025). No Brasil, o Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2025, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pondera que, mesmo diante da reconhecida abundância hídrica do território, a distribuição desigual e a deterioração da qualidade das águas comprometem o abastecimento em diversas regiões (ANA, 2025). Dados do MapBiomas reforçam esse diagnóstico: a superfície de água no país em 2024 foi de 17,9 milhões de hectares — 2% inferior ao registrado em 2023 e 4% abaixo da média histórica —, sinalizando uma tendência preocupante de retração dos recursos hídricos superficiais (MAPBIOMAS, 2025).

A contaminação microbiológica dos corpos hídricos representa risco direto à saúde pública, sobretudo em regiões de infraestrutura sanitária deficiente. Os coliformes totais reúnem um grupo diversificado de bactérias da família Enterobacteriaceae e funcionam como indicadores gerais da qualidade sanitária da água. Dentro desse grupo, as termotolerantes — com destaque para *Escherichia coli* — são tomadas como os indicadores mais adequados de contaminação fecal recente, já que sua presença sinaliza o aporte de matéria orgânica de origem entérica e a possível ocorrência de microrganismos patogênicos (Pachepsky; Shelton, 2011). A detecção de *E. coli* é particularmente relevante por se tratar de espécie exclusivamente associada ao trato intestinal de animais de sangue quente, o que lhe confere alta especificidade como bioindicador (CETESB, 2023).

No litoral norte de São Paulo, a combinação entre crescimento urbano desordenado e turismo sazonal intensifica a degradação dos recursos hídricos. O Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Litoral Norte (UGRHI-03) 2025, elaborado pelo Comitê de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte (CBH-LN) com dados de 2024, mostra que a cobertura de esgotamento sanitário nos municípios da região permanece bastante aquém da média estadual (CBH-LN, 2025). Em escala nacional, o Ranking do Saneamento 2026, do Instituto Trata Brasil, baseado em dados do SINISA (ano-base 2024), aponta que mais de 30 milhões de brasileiros seguem sem acesso à água potável e cerca de 90 milhões não contam com coleta de esgoto; entre os 100 maiores municípios, 51 investem menos de R$ 100 por habitante/ano em saneamento, quando o patamar ideal seria de R$ 225 para alcançar a universalização até 2033 (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2026).

Ilhabela, município insular do litoral norte paulista, ilustra de modo emblemático esse quadro. De acordo com os dados mais recentes do SINISA 2025 (ano-base 2024), apenas 56,2% da população total — estimada em 36.329 habitantes — é atendida por serviços formais de coleta de esgoto, o que equivale a dizer que 15.907 moradores não têm o esgoto coletado pela rede pública. Do volume total gerado (3.124,8 mil m³/ano), 56,8% é coletado e tratado; os restantes 1.350,2 mil m³ são despejados na natureza sem qualquer tratamento. Some-se a isso o consumo per capita de água do município — 310,2 L/hab./dia, bem acima da média nacional de 180 L/hab./dia —, que reflete o peso da população flutuante turística (IAS, 2025; SINISA, 2025). O Censo Demográfico 2022 do IBGE, que adota definição mais ampla de esgotamento sanitário — incluindo soluções individuais, como fossas ligadas à rede e rede pluvial —, registra que 61,5% dos domicílios de Ilhabela utilizam rede geral, rede pluvial ou fossa ligada à rede; 33,5% recorrem a fossa séptica não ligada à rede; e 3,8% dependem de fossa rudimentar ou buraco (IBGE, 2023). A diferença entre os 61,5% do IBGE e os 56,2% do SINISA decorre, portanto, da distinção metodológica entre o conceito amplo de esgotamento adotado pelo Censo e o critério mais estrito do SINISA, restrito à coleta formal por rede pública. O cenário é especialmente delicado para os cursos d'água que drenam as encostas da ilha, onde cachoeiras destinadas à recreação de contato primário recebem aporte difuso de efluentes domésticos nas áreas de menor altitude.

A Cachoeira do Paquetá, na vertente oeste de Ilhabela, nasce em área de Mata Atlântica preservada acima de 200 metros de altitude e percorre um gradiente altitudinal até desaguar na zona costeira antropizada, ao nível do mar. Essa configuração geográfica oferece um modelo natural para investigar a relação entre ocupação humana e degradação da qualidade microbiológica da água, ao permitir isolar o efeito do uso e ocupação do solo ao longo de um transecto vertical bem definido.

A hipótese central deste trabalho é a de que a contaminação por coliformes totais e *E. coli* aumenta progressivamente ao longo do gradiente altitudinal descendente da Cachoeira do Paquetá, acompanhando o incremento da pressão antrópica nas áreas mais baixas. Nesse sentido, o objetivo geral foi avaliar a variação espacial da qualidade microbiológica da água em cinco pontos

amostrais distribuídos entre 212 m e 6 m de altitude — adotando coliformes totais e *E. coli* como indicadores — e testar estatisticamente a existência de diferenças significativas entre os pontos, bem como sua correlação com a altitude.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido na Cachoeira do Paquetá, no município de Ilhabela, litoral norte do estado de São Paulo (coordenadas centrais aproximadas: 23°47′S, 45°21′W). Inserido no bioma Mata Atlântica, o município apresenta relevo acidentado e cursos d'água de pequena extensão, encaixados entre as encostas da Serra de Ilhabela e a zona costeira. O trecho superior da cachoeira percorre área de floresta ombrófila densa bem conservada e, à medida que perde altitude, atravessa zonas de ocupação urbana progressivamente mais densa.

Foram estabelecidos cinco pontos amostrais (P1 a P5) ao longo do gradiente altitudinal, conforme pode ser visualizado na Figura 1 e descrito na Tabela 1.

Figura 1 - Área de estudo da Cachoeira do Paquetá em Ilhabela – SP.

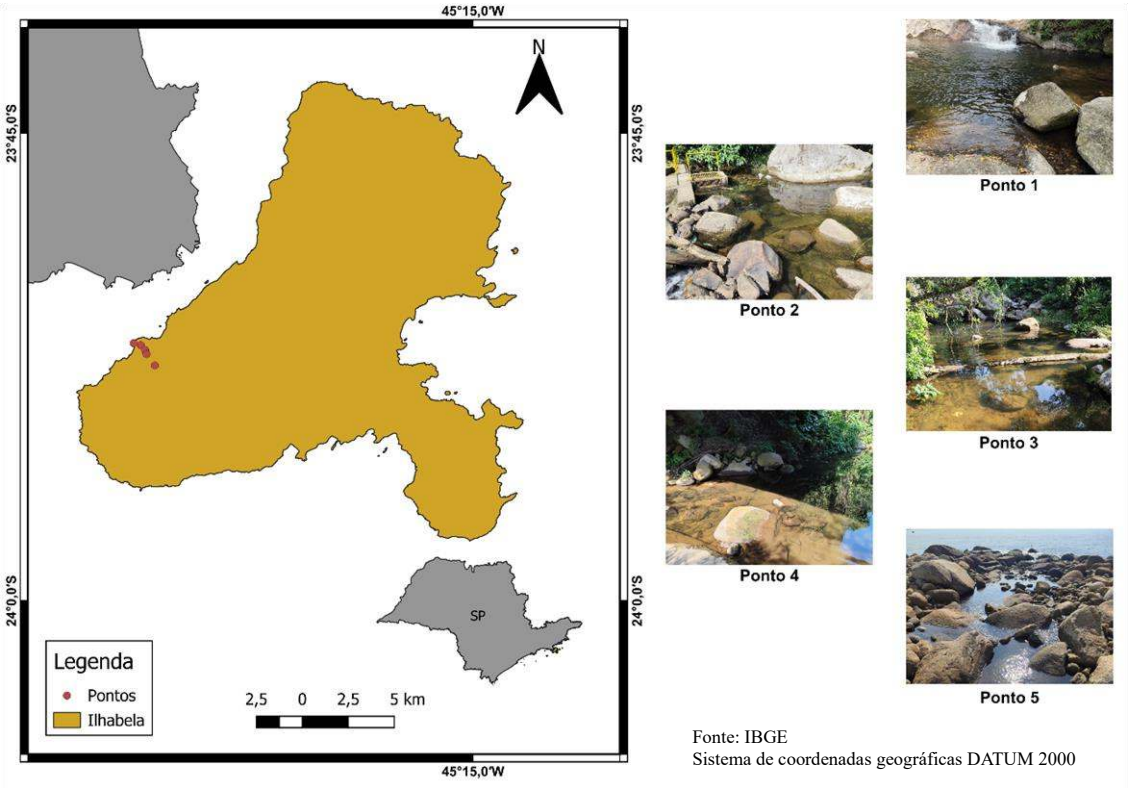


Tabela 1 — Caracterização dos pontos amostrais ao longo do gradiente altitudinal da Cachoeira do Paquetá, Ilhabela (SP).

Ponto amostragem	Latitude	Longitude	Altitude	Característica ambiental
Ponto 1	23º52'27"S	45º25'13"W	212m	Nascente; Mata Atlântica preservada; sem ocupação humana visível.
Ponto 2	23º52'5"S	45º25'29"W	93m	Trecho intermediário superior; vegetação densa; sem edificações.
Ponto 3	23º51'57"S	45º25'32"W	63m	Trecho intermediário; transição para área de borda de mata.
Ponto 4	23º51'48"S	45º25'40"W	35m	Trecho inferior; proximidade de trilhas e residências esporádicas
Ponto 5	23º51'44"S	45º25'54"W	6m	Trecho final; área urbana consolidada próxima ao nível do mar

2.2. Coletas

Entre abril e maio de 2025, realizaram-se cinco campanhas de coleta, com periodicidade aproximadamente quinzenal, nas seguintes datas: 23/04/2025, 28/04/2025, 05/05/2025, 14/05/2025 e 20/05/2025. Em cada campanha, foram coletadas amostras nos cinco pontos, perfazendo um total de 25 amostras. A coleta seguiu procedimento manual, em frascos estéreis de polipropileno de 100 mL, com imersão a cerca de 20 cm abaixo da superfície, em zona de fluxo representativo do curso d'água. A temperatura da água foi aferida in situ com termômetro digital (precisão ± 0,1 °C).

2.3. Análise microbiológica

A quantificação de coliformes totais e *E. coli* baseou-se no sistema cromogênico Compact Dry EC (Hardy Diagnostics, cat. nº 54082; fabricante original: Shimadzu Diagnostics Corporation, Japão). Trata-se de método validado pela AOAC Research Institute (Certificado nº 110402), MicroVal (Certificados nº 2008LR04 e 2008LR05), NordVal (Certificado nº 036) e AFNOR (Certificados nº SDC 42/01-12/24 e SDC 42/02-12/24), com faixa de enumeração recomendada entre 1 e 250 UFC por placa.

O procedimento analítico consistiu na inoculação de 1 mL de amostra diretamente sobre a placa Compact Dry EC, sem diluição prévia. As placas foram incubadas a 37 ± 1 °C por 24 ± 2 horas e, ao fim desse período, procedeu-se à contagem: as colônias vermelhas/rosa foram registradas como coliformes totais (incluindo E. coli) e as azuis/roxas, especificamente como E. coli. Os resultados foram expressos em UFC/mL, correspondendo ao volume de 1 mL inoculado. Cabe explicitar três limitações metodológicas relevantes. Em primeiro lugar, não foram realizadas diluições seriadas nem réplicas analíticas, o que impede a estimativa do erro experimental intra-amostra. Em segundo lugar, valores acima de 250 UFC/placa extrapolam a faixa de enumeração validada pelo fabricante (1–250 UFC/placa), de modo que medidas

superiores a esse limiar — como as registradas pontualmente em P4 — devem ser interpretadas como estimativas, possivelmente subcontadas. Em terceiro lugar, a conversão dos resultados de UFC/mL para UFC/100 mL — necessária para comparação com os padrões da Resolução CONAMA nº 274/2000 — assume distribuição homogênea de microrganismos na amostra, premissa nem sempre satisfeita por bactérias com distribuição agregada (Poisson superdispersa); os valores convertidos devem, portanto, ser interpretados com cautela.

2.4. Análise estatística

Todas as análises foram conduzidas no software R versão 4.3 (R Core Team, 2023), com o auxílio dos pacotes agricolae, car, multcomp e ggplot2, adotando-se nível de significância $\alpha = 0,05$. O conjunto analítico contemplou: estatística descritiva (média aritmética, desvio-padrão (DP), erro-padrão (EP), mediana, mínimo e máximo para CT e EC em cada ponto amostral); verificação dos pressupostos por meio do teste de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos por ponto) e do teste de Levene (homogeneidade de variâncias). Como o Shapiro-Wilk indicou violação da normalidade em parte dos pontos ($p < 0,05$ em P4 para CT e em P1, P2 para EC) e o teste de Levene evidenciou heterogeneidade de variâncias entre os grupos, optou-se por aplicar de forma complementar a ANOVA one-way — robusta a moderados desvios da normalidade em delineamentos balanceados — e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, considerando-se significativas apenas as diferenças confirmadas por ambos. Aplicou-se ainda o post-hoc de Tukey HSD (Honestly Significant Difference), para identificar quais pares de pontos diferiam, com atribuição de letras de agrupamento; e a correlação de Pearson, para avaliar a associação linear entre altitude e contagens de CT e EC, tanto em nível individual (n = 25 amostras) quanto em nível de médias por ponto (n = 5).

3. RESULTADOS

3.1. Temperatura da água

A temperatura da água oscilou entre 20 °C e 23 °C ao longo das cinco campanhas. O ponto P1 (212 m) registrou a menor média térmica (20,6 ± 0,9 °C), enquanto P2 a P5 apresentaram médias muito próximas entre si, em torno de 21,6 ± 0,9 °C, sem diferença estatística entre os pontos ($p > 0,05$). A Tabela 2 reúne os valores de temperatura registrados por ponto e campanha.

Tabela 2 — Temperatura da água (°C) nos cinco pontos amostrais ao longo das cinco campanhas de coleta.

Ponto	02/04	23/04	05/05	13/05	20/05	Média ± DP
P1	22	21	20	20	20	20,6 ± 0,9
P2	23	22	21	21	21	21,6 ± 0,9
P3	23	22	21	21	21	21,6 ± 0,9
P4	23	22	21	21	21	21,6 ± 0,9
P5	23	22	21	21	21	21,6 ± 0,9

3.2. Coliformes totais

Os resultados da contagem de coliformes totais por ponto e campanha encontram-se na Tabela 3, com a estatística descritiva resumida na Tabela 4 e ilustrados na Figura 2.

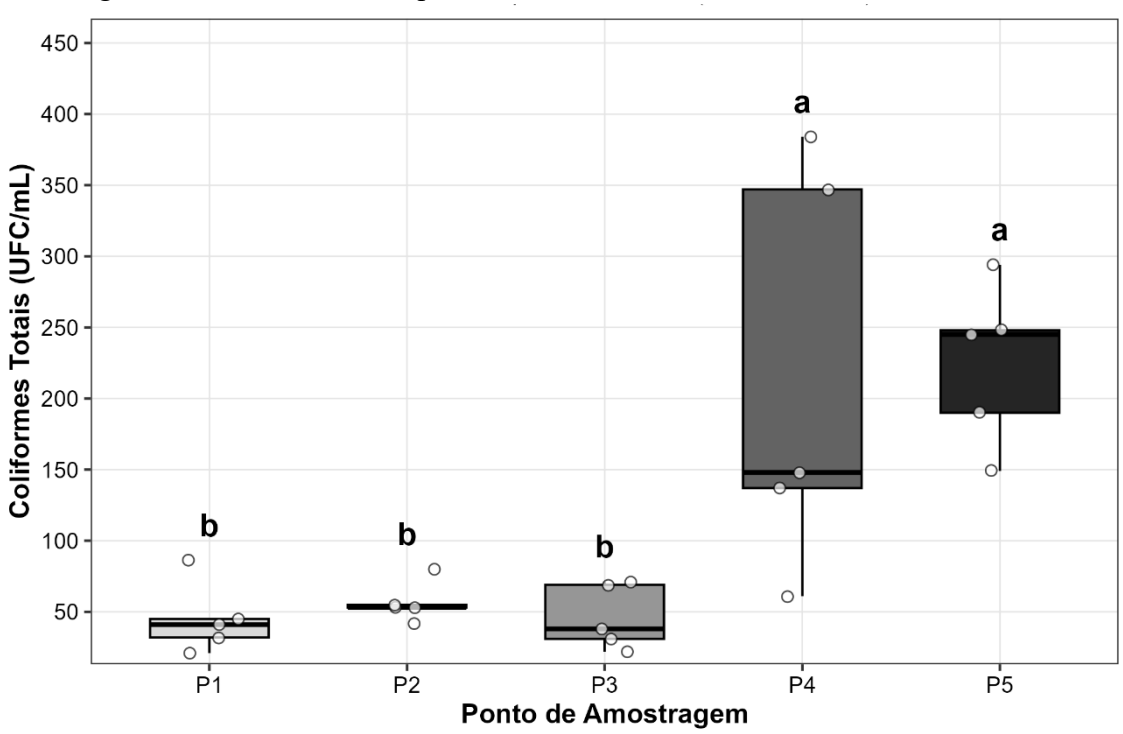
Tabela 3 — Contagem de coliformes totais (UFC/mL) por ponto amostral e campanha de coleta.

Campanha	Data	P1	P2	P3	P4	P5
1	23/04/2025	45	53	71	347	248
2	28/04/2025	86	53	38	61	149
3	05/05/2025	21	55	22	137	190
4	14/05/2025	41	80	69	384	294
5	20/05/2025	32	42	31	148	245

Tabela 4 — Estatística descritiva de coliformes totais (UFC/mL) por ponto amostral

Ponto	Altitude (m)	Média	DP	EP	Mediana	Min	Max	Grupo Tukey
P1	212	45,0	24,2	10,8	41	21	86	a
P2	93	56,6	14,2	6,4	53	42	80	a
P3	63	46,2	22,5	10,1	38	22	71	a
P4	35	215,4	139,9	62,6	148	61	384	b
P5	6	225,2	55,5	24,8	245	149	294	b

Figura 2 – Boxplot da distribuição de coliformes totais (UFC/mL) por ponto de amostragem na Cachoeira do Paquetá, Ilhabela - SP.



Legenda: Letras distintas ("a" e "b") indicam diferença significativa pelo teste de Tukey HSD ($p < 0,05$).

A Figura 2 evidencia a separação entre os dois agrupamentos: P1, P2 e P3 (Grupo "b") concentram suas medianas na faixa de 38–53 UFC/mL e exibem baixa dispersão; já P4 e P5 (Grupo "a") atingem medianas de 148 e 245 UFC/mL, respectivamente, sobressaindo-se a ampla variabilidade de P4 (amplitude de 61 a 384 UFC/mL). A ANOVA one-way confirmou diferenças entre os pontos ($F_{4,20} = 9,19$; $p = 0,0002$) e o teste de Kruskal-Wallis ratificou o achado ($H = 15,83$; $p = 0,0033$). As comparações relevantes encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 — Resultados do teste de Tukey HSD para coliformes totais (CT). Comparação par a par entre os cinco pontos amostrais.

Comparação	Diferença	IC 95% inferior	IC 95% superior	P ajustado	Significativo
P2 – P1	11,6	-119,3	142,5	0,9978	Não
P3-P1	1,2	-129,7	132,1	1,0000	Não
P4-P1	170,4	39,5	301,3	0,0068	Sim
P5-P1	180	49,3	311,1	0,0042	Sim
P3-P2	-10,4	-141,3	120,5	0,9985	Não
P4-P2	158,8	27,9	289,7	0,0120	Sim
P5-P2	168,6	37,7	299,5	0,0074	Sim
P4-P3	169,2	38,8	300,1	0,0070	Sim
P5-P3	179	48,1	309,9	0,0040	Sim
P5-P4	9,8	-121,1	140,7	0,9987	Não

3.3. *Escherichia coli*

Os resultados de *E. coli* encontram-se nas Tabelas 6 e 7 e ilustrados na Figura 3.

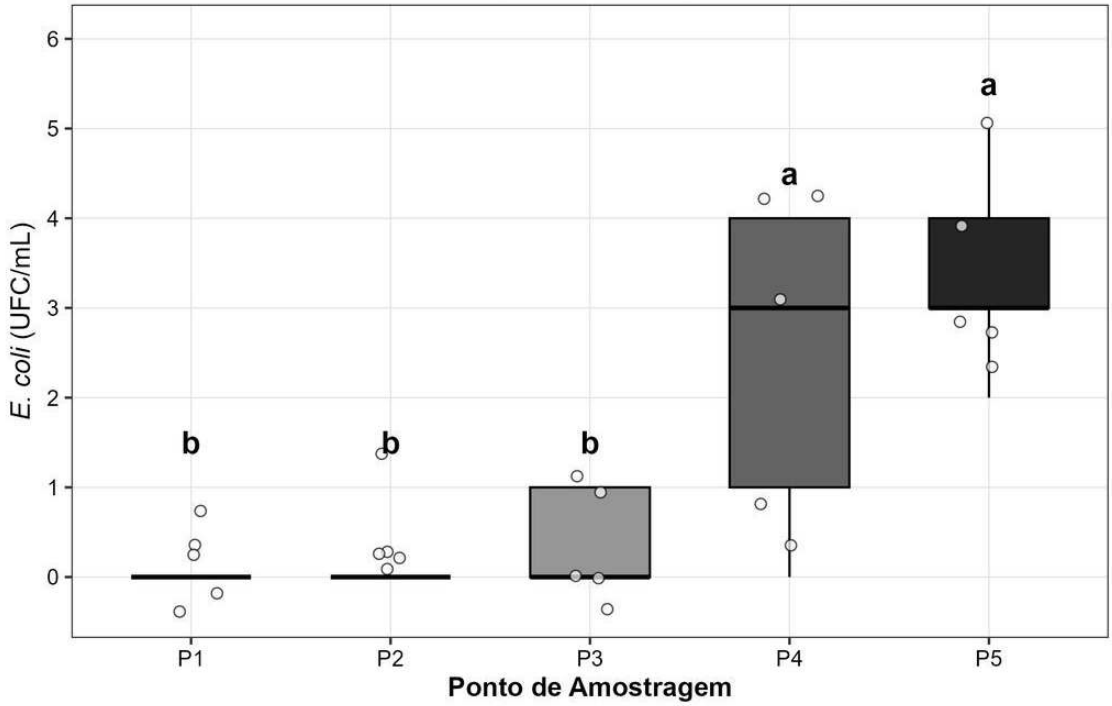
Tabela 6 — Contagem de *Escherichia coli* (UFC/mL) por ponto amostral e campanha de coleta.

Campanha	Data	P1	P2	P3	P4	P5
1	23/04/2025	0	0	1	3	3
2	28/04/2025	1	1	0	0	3
3	05/05/2025	0	0	0	4	4
4	14/05/2025	0	0	1	4	5
5	20/05/2025	0	0	0	1	2

Tabela 7 — Estatística descritiva de *Escherichia coli* (UFC/mL) por ponto amostral

Ponto	Altitude (m)	Média	DP	EP	Mediana	Min	Max	Grupo Tukey
P1	212	0,20	0,447	0,200	0	0	1	b
P2	93	0,20	0,447	0,200	0	0	1	b
P3	63	0,40	0,548	0,245	0	0	1	b
P4	35	2,40	1,817	0,812	3	0	4	a
P5	6	3,40	1,140	0,510	3	2	5	a

Figura 3 – Boxplot da distribuição de *Escherichia coli* (UFC/mL) por ponto de amostragem na Cachoeira do Paquetá, Ilhabela - SP.



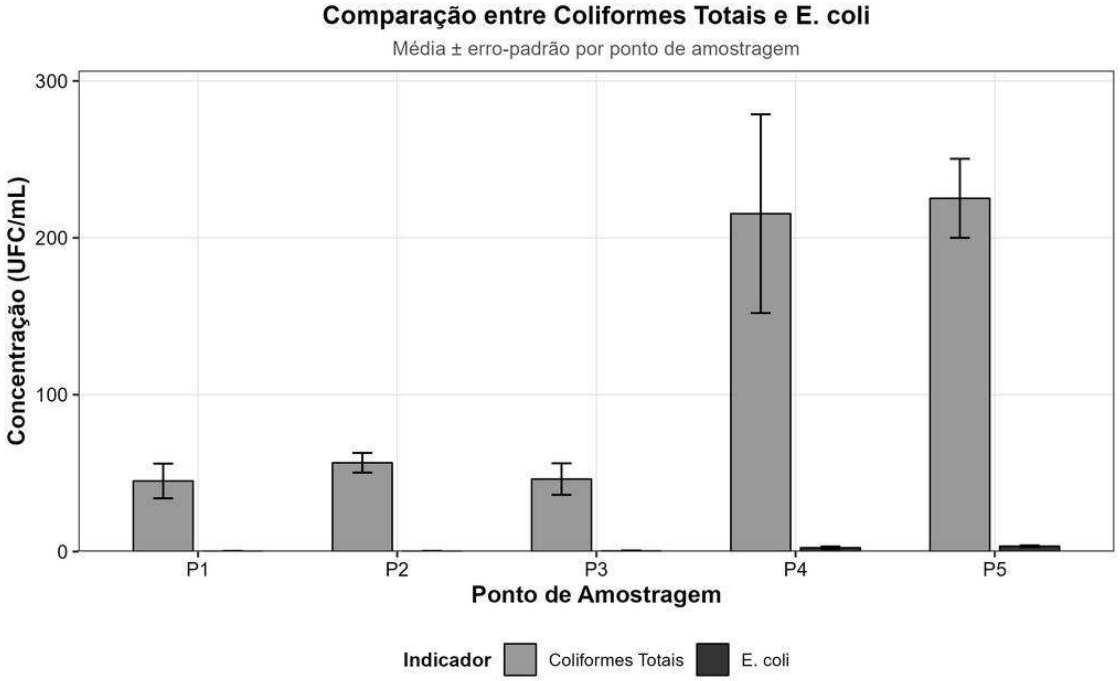
Legenda: Letras distintas ("a" e "b") indicam diferença significativa pelo teste de Tukey HSD ($p < 0,05$).

A Figura 3 mostra que, em P1 e P2, a mediana de *E. coli*é zero, com ocorrências esporádicas de apenas 1 UFC/mL. P3 segue padrão semelhante, ainda que com discreta elevação. Nos pontos P4 e P5 (Grupo "a"), as medianas chegam a 3 UFC/mL, com P5 atingindo máximo de 5 UFC/mL. A ANOVA confirmou as diferenças ($F_{4,20} = 10,43$; $p = 0,0001$), e o teste de Kruskal-Wallis as ratificou ($H = 17,21$; $p = 0,0018$).

3.4. Comparação integrada entre CT e EC

A Figura 4 apresenta a comparação direta entre as médias (± erro-padrão) de coliformes totais e *E. coli*para cada ponto de amostragem, permitindo visualizar a magnitude relativa de ambos os indicadores.

Figura 4 — Gráfico de barras agrupadas comparando as médias (± erro-padrão) de coliformes totais e *E. coli* (UFC/mL) por ponto de amostragem.

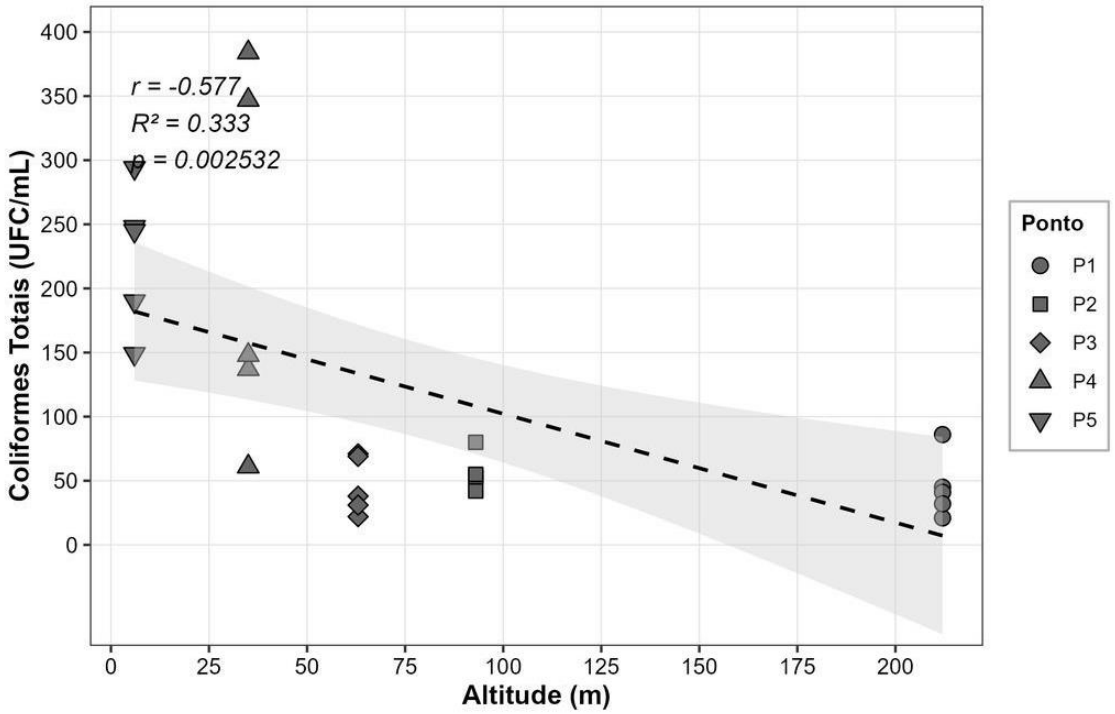


A Figura 4 deixa evidente a marcada diferença de escala entre CT e EC: ao passo que as médias de CT em P4 e P5 ultrapassam 200 UFC/mL, as de EC nesses mesmos pontos permanecem abaixo de 4 UFC/mL. Tal disparidade sugere que a maior parte dos coliformes detectados a jusante não corresponde a E. coli, e sim a outras espécies de coliformes de origem ambiental (por exemplo, Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter), possivelmente associadas à decomposição de matéria orgânica vegetal e ao solo exposto nas áreas antropizadas.

3.5. Correlação com altitude

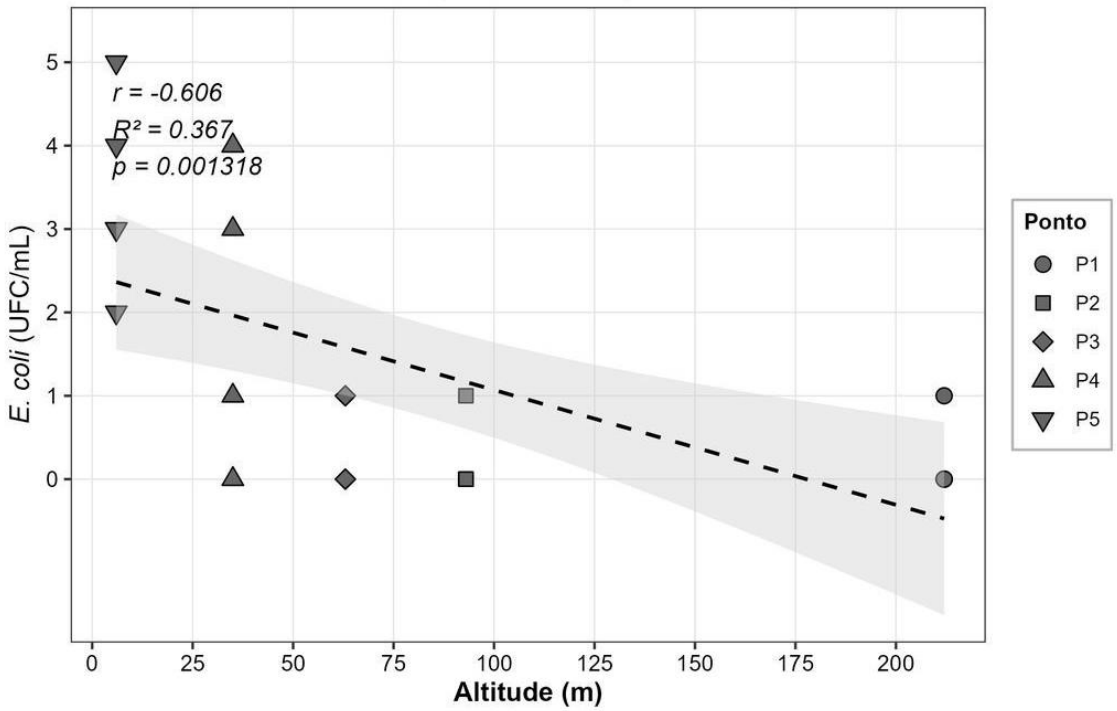
A Figura 5 ilustra a correlação entre altitude e coliformes totais, e a Figura 6 apresenta a correlação entre altitude e E. coli.

Figura 5 — Diagrama de dispersão entre altitude (m) e coliformes totais (UFC/mL), com reta de regressão linear e intervalo de confiança de 95% (n = 25 amostras).



Valores de r, R^2 e p calculados pelo teste de correlação de Pearson.

Figura 6 — Diagrama de dispersão entre altitude (m) e *Escherichia coli* (UFC/mL), com reta de regressão linear e intervalo de confiança de 95% (n = 25 amostras).



As Figuras 5 e 6 expõem correlações negativas moderadas e significativas. Para coliformes totais (Figura 5), a correlação de Pearson foi r = −0,577 (R^2 = 0,333; p = 0,0025), de modo que a altitude responde por cerca de 33% da variação nas contagens individuais de CT. Para *E. coli*(Figura 6),

a associação é ligeiramente mais forte: r = −0,606 (R^2 = 0,367; p = 0,0013), com a altitude explicando 37% da variação. A dispersão mais acentuada nos pontos de baixa altitude — sobretudo em P4 — reflete a contaminação episódica que amplia a variância nesses locais. A Tabela 8 sintetiza os resultados de correlação.

Tabela 8 — Correlação de Pearson entre altitude e parâmetros microbiológicos.

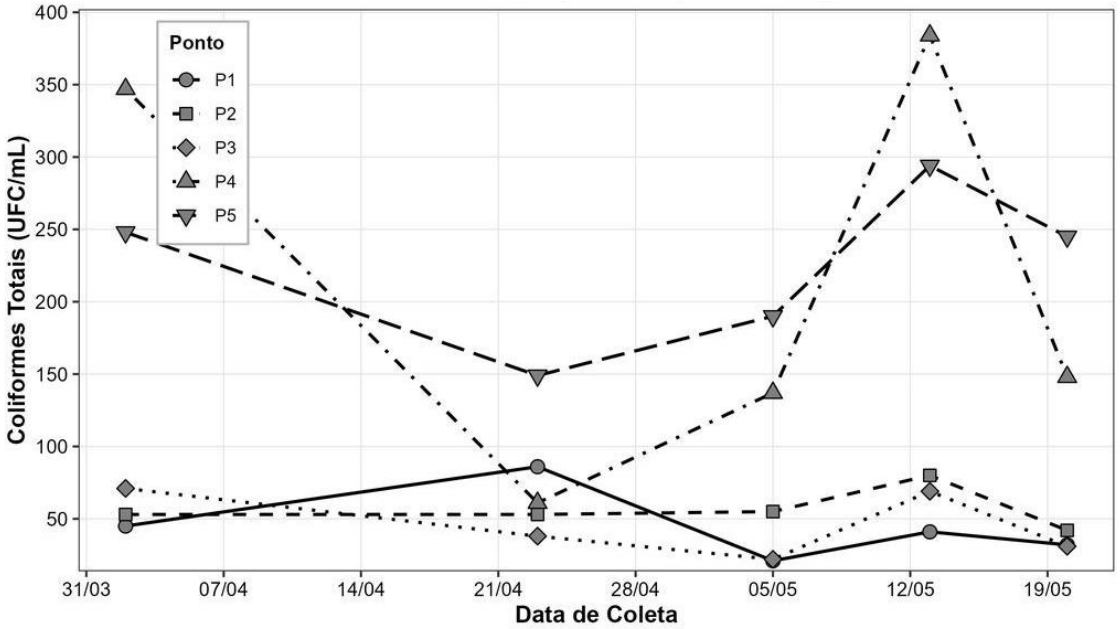
Parâmetro	Nível	n	r	R^2	p-valor
CT	Individual	25	-0,577	0,333	0,0025
EC	Individual	25	-0,606	0,367	0,0013
CT	Média/ponto	5	-0,949	0,901	0,014
EC	Média/ponto	5	-0,970	0,941	0,007

Os coeficientes calculados a partir das médias por ponto (n = 5) são consideravelmente mais elevados (r = −0,949 para CT; r = −0,970 para EC), o que decorre da eliminação da variação intra-ponto. Ainda assim, a análise com dados individuais (n = 25) é estatisticamente mais conservadora e foi adotada como referência principal neste trabalho.

3.6. Variação temporal

A Figura 7 apresenta a variação temporal dos coliformes totais ao longo das cinco campanhas de coleta, permitindo identificar padrões temporais por ponto amostral.

Figura 7 — Variação temporal de coliformes totais (UFC/mL) ao longo das cinco campanhas de coleta (abril–maio/2025) para cada ponto amostral.



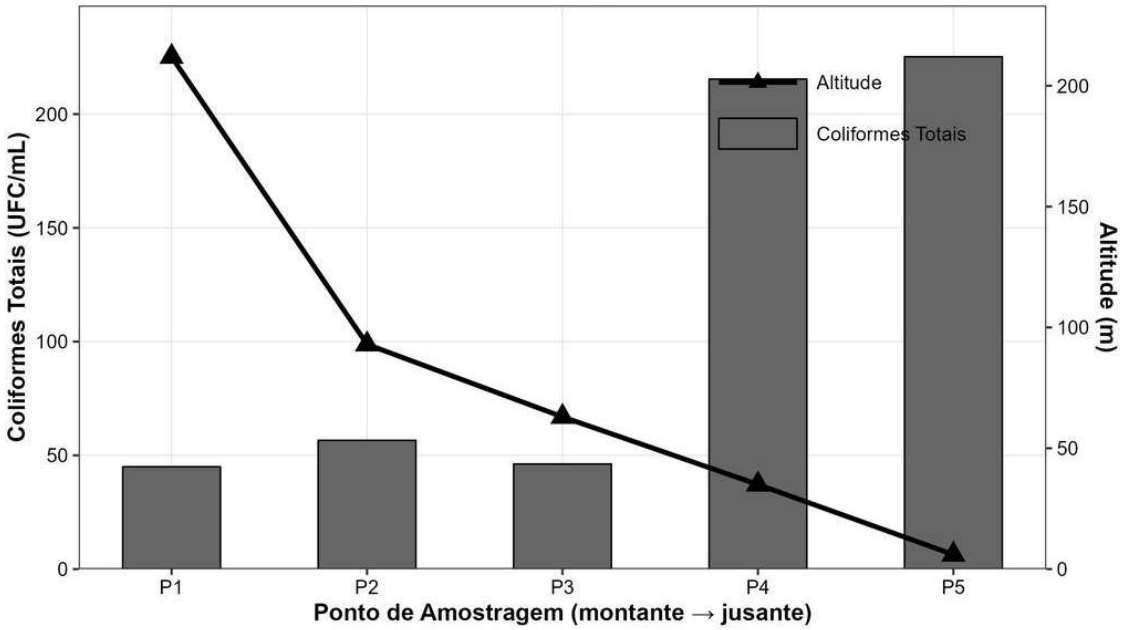
A Figura 7 mostra que P1, P2 e P3 mantiveram contagens relativamente estáveis ao longo do período amostral, oscilando em baixa amplitude (faixa de 21–86 UFC/mL). P4, em contraste, apresentou flutuações marcantes: um vale na segunda campanha (61 UFC/mL em 23/04) e um pico expressivo na quarta (384 UFC/mL em 13/05). Trata-se de comportamento compatível com contaminação episódica, possivelmente associada a eventos de precipitação ou ao transbordo de sistemas individuais de esgotamento sanitário. P5, ainda que apresente valores consistentemente elevados, mostrou amplitude menor do

que P4, o que aponta para uma fonte de contaminação mais constante e difusa.

3.7. Perfil altitudinal integrado

A Figura 8 integra os dados de altitude e contaminação por coliformes totais em um único perfil altitudinal, proporcionando uma visualização do gradiente montante–jusante.

Figura 8 — Perfil altitudinal integrado: barras representam a média de coliformes totais (UFC/mL, eixo esquerdo) e a linha com marcadores representa a altitude de cada ponto (m, eixo direito), na sequência montante → jusante.



A Figura 8 torna visualmente inequívoca a relação inversa entre altitude e contaminação: à medida que a altitude diminui de P1 (212 m) para P5 (6 m), as médias de coliformes totais crescem progressivamente. A inflexão mais abrupta ocorre entre P3 (63 m; 46,2 UFC/mL) e P4 (35 m; 215,4 UFC/mL), faixa que coincide com o início da ocupação urbana ao longo do curso d'água.

4. DISCUSSÃO

Os resultados aqui obtidos indicam, de forma coerente, que a qualidade microbiológica da água na Cachoeira do Paquetá se degrada à medida que se desce o gradiente altitudinal, confirmando a hipótese de que a pressão antrópica nas porções mais baixas é o principal vetor de contaminação. A formação de dois grupos estatisticamente distintos — Grupo “a” (P4 e P5, abaixo de 35 m) e Grupo “b” (P1, P2 e P3, acima de 63 m) — delineia um limiar espacial nítido, que coincide com a transição entre a Mata Atlântica preservada e a zona de ocupação urbana (Figuras 2 e 3).

A correlação negativa entre altitude e contagens microbiológicas, ainda que moderada em nível individual ($r = -0{,}577$ para CT; $r = -0{,}606$ para EC; Figuras 5 e 6), é estatisticamente significativa ($p < 0{,}003$ para ambos) e consistente com o modelo conceitual de uma contaminação que se acumula no sentido montante–jusante. O fato de a altitude responder por apenas 33–37% da variação individual reflete a influência de fatores não mensurados neste estudo

— precipitação antecedente, vazão, sazonalidade turística e estado específico dos sistemas de esgotamento de cada trecho — que contribuem para a dispersão dos dados, em especial em P4. Ao se filtrarem essas flutuações intra-ponto e adotarem-se as médias (n = 5), os coeficientes saltam para r = −0,949 (CT) e r = −0,970 (EC), o que confirma o gradiente altitudinal como excelente preditor da contaminação média espacial.

O padrão observado dialoga com a literatura sobre contaminação microbiológica de corpos hídricos em áreas de Mata Atlântica no litoral paulista. Brum et al. (2016), em estudo de modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos no sistema costeiro de Ubatuba (SP), mostraram que as concentrações bacterianas na zona costeira sofrem forte influência do lançamento de efluentes domésticos provenientes de córregos que drenam áreas urbanizadas. Os autores registraram, em alta temporada, concentrações médias de coliformes da ordem de 1.000 NMP/100 mL no ponto mais impactado e picos de $5{,}7 \times 10^4$ NMP/100 mL nos afluentes — valores que ilustram a magnitude do problema sanitário na região (Brum et al., 2016).

Bertan et al. (2024), ao avaliarem a balneabilidade das praias do Lázaro, Domingas Dias e Perequê-Mirim, em Ubatuba, constataram que as condições sanitárias inadequadas — com parcela expressiva dos domicílios dependentes de fossas rudimentares — repercutem diretamente nas densidades de coliformes e *E. coli* das águas costeiras. Os autores também destacaram a deterioração persistente da classificação de balneabilidade entre 2007 e 2022, com aumento da frequência de amostras impróprias nas praias mais próximas a desembocaduras de córregos receptores de efluentes (Bertan et al., 2024). Trata-se de cenário em tudo comparável ao observado na Cachoeira do Paquetá, onde os pontos P4 e P5 — situados em áreas sob influência de residências com sistemas individuais de tratamento (fossas) — apresentaram contaminação significativamente superior à dos pontos de montante.

A avaliação multivariada da qualidade da água em rios de Mata Atlântica publicada na Scientific Reports demonstrou que o Índice de Qualidade da Água melhora de forma significativa nos trechos de cabeceira com cobertura florestal preservada e piora nas áreas de ocupação urbana, com os coliformes termotolerantes figurando entre as variáveis de maior peso na composição do índice (Oliveira et al., 2020) — achado que dialoga diretamente com o gradiente identificado neste estudo. Em linha semelhante, estudo recente sobre o reservatório de Guarapiranga — segundo maior manancial de São Paulo — mostrou que, mesmo em corpos hídricos legalmente protegidos, a pressão de ocupação irregular do entorno resulta em contaminação persistente, reforçando a importância de integrar o monitoramento microbiológico com variáveis físico-químicas (Nascimento et al., 2025).

A elevada variabilidade observada em P4 (DP = 139,9 UFC/mL para CT), bem visível no boxplot da Figura 2 e na série temporal da Figura 7, sugere um padrão de contaminação episódica. Na Figura 7, P4 exibe queda acentuada na segunda campanha (23/04: 61 UFC/mL), seguida de pico na quarta (13/05: 384 UFC/mL), enquanto os pontos de montante permanecem estáveis. Esse comportamento é coerente com eventos de transbordo de fossas sépticas ou de sistemas de esgotamento precários

durante períodos de chuvas mais intensas — fenômeno amplamente documentado pela CETESB (2023) para o litoral norte de São Paulo. Cabe reconhecer, contudo, que este estudo não incorporou dados pluviométricos diretos do período de coleta; trata-se, portanto, de uma hipótese explicativa plausível, mas que deverá ser testada em trabalhos futuros que articulem séries de precipitação obtidas junto ao INMET ou à CETESB às contagens microbiológicas. Já o ponto P5 mantém contagens consistentemente elevadas (149–294 UFC/mL), mas com menor variabilidade (DP = 55,5), o que aponta para uma fonte de contaminação mais constante e difusa, provavelmente vinculada à rede de esgoto insuficiente na área urbana consolidada ao nível do mar.

A Figura 4 (barras agrupadas) expõe a diferença de escala entre CT e EC: nos pontos P4 e P5, as médias de CT superam 200 UFC/mL, ao passo que as de EC ficam abaixo de 4 UFC/mL. A disparidade sinaliza que a maior parte dos coliformes nos pontos antropizados não corresponde a E. coli, mas a outras enterobactérias de origem ambiental ou entérica não fecal (por exemplo, Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter). Ainda assim, a presença confirmada de *E. coli* em P4 e P5 — ausente ou apenas esporádica nos pontos de montante — configura evidência inequívoca de contaminação fecal recente nesses trechos.

O perfil altitudinal integrado (Figura 8) oferece a leitura mais intuitiva do fenômeno: a inversão entre as curvas de altitude (descendente) e de contaminação (ascendente) traduz, em imagem, a relação entre degradação ambiental e ocupação humana — uma representação de fácil comunicação tanto para gestores públicos quanto para a comunidade.

A precariedade sanitária de Ilhabela, documentada nos dados oficiais do SINISA 2025 (ano-base 2024) e do Instituto Água e Saneamento, oferece a explicação estrutural mais plausível para o quadro descrito. Com apenas 56,2% da população atendida por coleta de esgoto e 1.350,2 mil m³ de esgotos despejados anualmente na natureza sem tratamento, a pressão sobre os corpos hídricos do município é significativa. Os investimentos da SABESP — estimados em R$ 400 milhões até 2026, com meta de universalização antecipada para 2029 — abrem, contudo, perspectiva de melhoria no médio prazo (CÂMARA MUNICIPAL DE ILHABELA, 2025). A eficácia dessas obras deverá ser objeto de monitoramento futuro.

Cabe ressalvar que este estudo não permite estabelecer relação causal direta entre os índices de contaminação da Cachoeira do Paquetá e indicadores de saúde pública. Embora a contaminação fecal seja fator de risco reconhecido para doenças diarreicas agudas, atribuir casos específicos a uma fonte hídrica determinada exige estudos epidemiológicos com desenho próprio.

5. CONCLUSÕES

Os resultados confirmam a hipótese de que a contaminação por coliformes totais e *Escherichia coli* na Cachoeira do Paquetá cresce de modo significativo ao longo do gradiente altitudinal descendente, acompanhando a intensificação da pressão antrópica. A análise estatística delineou dois agrupamentos homogêneos bem distintos: os pontos de montante (P1, P2 e P3, Grupo “b”), em áreas de Mata Atlântica preservada e com baixos níveis de contaminação; e os pontos de jusante (P4 e P5, Grupo “a”), sob influência urbana, com contagens

significativamente superiores (ANOVA: $p = 0{,}0002$ para CT; $p = 0{,}0001$ para EC). A correlação negativa entre altitude e contagens microbiológicas ($r = -0{,}577$ para CT; $r = -0{,}606$ para EC; $p < 0{,}003$) reforça o papel do gradiente topográfico, tomado como proxy do gradiente de ocupação, enquanto preditor relevante da qualidade da água neste transecto.

Convertidas para UFC/100 mL, as médias de *E. coli* em P4 (240 UFC/100 mL) e P5 (340 UFC/100 mL) enquadram-se na categoria "muito boa" da Resolução CONAMA nº 274/2000 — aplicável a águas destinadas à recreação de contato primário —, mas ultrapassam o limite da categoria "excelente" (≤ 200 UFC/100 mL). Embora não configurem balneabilidade imprópria nos termos estritos da norma, esses valores representam alerta sanitário relevante em um corpo hídrico utilizado para banho, sobretudo considerando a tendência ascendente associada à pressão antrópica e as limitações metodológicas explicitadas (sem réplicas analíticas, sem diluições seriadas e com valores ocasionais fora da faixa de enumeração validada do método).

Recomenda-se, portanto, a implantação de um programa de monitoramento permanente, com abrangência sazonal, inclusão de parâmetros físico-químicos (pH, turbidez, oxigênio dissolvido), incorporação de dados pluviométricos das estações próximas, uso de volumes maiores de amostra com diluições seriadas e réplicas analíticas, além de medição concomitante de vazão. Recomenda-se ainda o acompanhamento dos efeitos das obras de saneamento em execução pela SABESP sobre os indicadores de qualidade hídrica do município.

REFERÊNCIAS

ANA — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: https://conjuntura-2025.webflow.io/. Acesso em: 19 maio 2025.

BERTAN, L. L.; ARRUDA, R. O. M.; COSTA, R. A.; SAAD, A. R.; FERREIRA, A. T.; BULBOVAS, P. H. Balneabilidade das praias do Lázaro, Domingas Dias e Perequê-Mirim, município de Ubatuba-SP, frente às condições dos meios físicos e socioambientais urbanas. Revista de Gestão Social e Ambiental (RGSA), v. 18, n. 3, e04646, 2024. DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-053.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Brasília: DOU, 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: DOU, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html.

BRASIL. Ministério das Cidades. SINISA — Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico 2025 (ano-base 2024). Brasília, 2025.

Disponível em: https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/.

BRUM, A. L.; ALBERGARIA-BARBOSA, A. C. R.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos em duas enseadas na região costeira de Ubatuba (SP), Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 2, p. 403–419, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522016150351.

CÂMARA MUNICIPAL DE ILHABELA. Câmara de Ilhabela cobra melhorias imediatas e investimentos da Sabesp. Ilhabela, 2025. Disponível em: https://camarailhabela.sp.gov.br/noticia.php?Id=2550.

CBH-LN — Comitê de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Litoral Norte 2025 (ano-base 2024). UGRHI-03. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.sigrh.sp.gov.br/cbhln/documentos.

CETESB — Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2022. São Paulo: CETESB, 2023. (Série Relatórios, ISSN 0103-4103). Disponível em: https://www.boletimdosaneamento.com.br/wp-content/uploads/2023/10/Relatorio-de-Qualidade-das-Aguas-Interiores-CETESB-2022.pdf.

HARDY DIAGNOSTICS. CompactDry™ EC — *E. coli*and Coliforms. Cat. nº 54082. Instruções de uso. Santa Maria, CA, 2024. Certificado AOAC nº 110402. Disponível em: https://hardydiagnostics.com/media/assets/product/documents/CompactDryEC.pdf.

IAS — Instituto Água e Saneamento. O saneamento em Ilhabela (SP). São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/sp/ilhabela.

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022: Ilhabela (SP). Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ilhabela.

INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. Ranking do Saneamento 2026. 18. ed. São Paulo, 2026. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2026/.

MAPBIOMAS. Panorama da Superfície de Água do Brasil 1985–2024. Coleção 4. São Paulo: MapBiomas, 2025. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2025/03/Factsheet_Agua_20.03_v5.pdf.

NASCIMENTO, A. *et al.* Presence of Coliforms and Reduced Water Quality in the Second Biggest Reservoir in São Paulo, Brazil. *Life*, v. 15, n. 5, p. 729, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/life15050729.

OLIVEIRA, K. S. S. et al. Water quality assessment based on multivariate statistics and water quality index of a strategic river in the Brazilian Atlantic Forest. Scientific Reports, v. 10, Article 22209, 2020. DOI:

https://doi.org/10.1038/s41598-020-78563-0.

PACHEPSKY, Y. A.; SHELTON, D. R. *Escherichia coli* and fecal coliforms in freshwater and estuarine sediments. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 41, n. 12, p. 1067–1110, 2011. DOI: https://doi.org/10.1080/10643380903392718.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: https://www.R-project.org/.

SOUZA, E. L.; ARAÚJO, M. C. B.; SILVA, J. S.; COSTA, M. F. Avaliação de coliformes na areia de praias urbanas do Rio Grande do Norte (nordeste do Brasil). Revista de Gestão Costeira Integrada (RGCI), 2025. DOI: https://doi.org/10.5894/rgci-n602.

UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2025: Montanhas e Geleiras — Torres de Água. Paris: UNESCO, 2025. DOI: https://doi.org/10.54679/RFZO5178